

基于 Optisystem 的光电色散补偿技术的性能分析

刘小磊¹ 熊雪娟²

(1. 河南理工大学物理与电子信息学院 焦作 454000; 2. 河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000)

摘要: 为了实现光信号的有效传输,减少光纤中色散和非线性效应对通信系统的影响,提出一种基于光纤布拉格光栅(fiber bragg grating,FBG)中间补偿的光电色散补偿技术,即在传输链路上采用 FBG 中间补偿方式,在接收端采用电色散补偿技术,分别实现了对 40 Gbit/s,归零(RZ)码信号的单信道和多信道系统的色散补偿。通过与全光色散补偿技术作对比,可以得到在入射功率较高的条件下,光电色散补偿技术的补偿性能明显优于全光色散补偿技术,同时能够保持较高的 Q 值,为系统以后的升级、扩容做铺垫。

关键词: 色散;光纤布拉格光栅;光电色散补偿技术;中间色散补偿

中图分类号: TN914 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5020

Performance analysis of photoelectric dispersion compensation technology based on optisystem

Liu Xiaolei¹ Xiong Xuejuan²

(1. School of Physics and Electronic Information Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to realize the effective transmission of optical signals, reduce the influence of optical fiber dispersion and nonlinearity on the communication system. In this paper, a new photoelectric dispersion compensation technology based on intermediate dispersion compensation of fiber bragg grating (FBG) is proposed, namely, applying intermediate dispersion compensation based on FBG in the transmission link and electrical dispersion compensation technique at the receiving end. Through this method, the dispersion compensation of single channel and multi-channel system for 40 Gbit/s, zero return (RZ) code signals is realized. Compared with the optical dispersion compensation technology, the compensation performance of photoelectric dispersion compensation technology is better than the optical dispersion compensation technology when the input power is high. At the same time, it can also maintain high Q value, pave the way for the upgrade and expansion of the system.

Keywords: dispersion; fiber Bragg grating; photoelectric dispersion compensation technique; intermediate dispersion compensation

0 引言

随着宽带网络的迅速兴起,巨大的数据需求量引发了人们对更高速率、更大容量、更长距离的光纤通信系统的追求。然而随着系统速率的提升,光纤中的色散、损耗、非线性效应等因素逐渐升级为限制因素。其中,损耗问题随着掺铒光纤放大器(erbium-doped optical fiber amplifier, EDFA)的出现已得到了改善。色散作为限制因素的一种,容易引起脉冲展宽,导致码间干扰,使系统误码率增加,系统性能降低,对高速光纤通信系统的影响非常严重,这将严重制约未来光纤通信系统的发展^[1-3]。

如何有效地解决色散对高速光纤通信系统的影响已经引起了学者的广泛关注,国内外学者已经先后提出了多种解决方法,主要包含光域和电域两大类,其中光域的色散补偿技术主要有色散补偿光纤(dispersion compensation fiber, DCF)、光纤布拉格光栅、色散支持传输、虚像相位阵列法等^[4-7];电域的色散补偿技术为电色散补偿技术^[8]。这些方法各有优缺点,本文在综合考虑各种方法的优缺点之后,提出了一种基于 FBG 中间补偿方案的光电色散补偿技术,即在光域中采用 FBG 中间色散补偿技术进行补偿;在电域中采用电色散补偿技术进行补偿。

本文利用光通信仿真软件 Optisystem 进行仿真分析,

完成了对 40 Gbit/s、RZ 信号传输 800 km 的 G. 652 光纤中的色散补偿,并将该技术有效地应用于多信道系统中,实现了对波分复用系统(wavelength division multiplexing, WDM)的色散补偿,这为光纤通信系统向更大容量、更高速率的方向发展提供了依据。

1 色散补偿原理

1.1 光纤布拉格光栅的补偿原理

光纤布拉格光栅 FBG 因其体积小,插入损耗低、非线性能力弱等优点而得到了广泛应用。它是一种利用反射滤波器制成的特殊色散补偿器件,当光脉冲经过光纤布拉格光栅时,不同频率的入射光信号在光栅的不同位置上进行反射,产生不同的时延。其中频率较大的光信号在光栅的近端反射,频率较小的光信号在光栅的远端反射,而两者的时延正好互补可以相互抵消,这样就能消除在光纤中传输时而引起的脉冲展宽,达到色散补偿的效果^[9]。

光纤布拉格光栅是一个周期性的结构,其纤芯折射率的值会周期性地改变,满足衍射原理^[10],故可通过布拉格条件 $2\Delta n_{\text{eff}} = \lambda_B$ 进行被反射波长的选择,而对于其他波长的光信号,具有带阻滤波特性。通常系统采用的工作波长 1 550 nm 恰好位于反常色散区域,在采用 FBG 进行色散补偿时,就能利用高频远端反射、低频近端反射的原理,补偿在光纤中传输时引起的时延。由于 FBG 对 G. 652 型标准 SMF 具有良好的兼容性,能够实现光纤色散和色散斜率的同时补偿,而且它的色散补偿量较大,能够减少使用 FBG 模块的数量,极大地减少了色散补偿的成本。因此采用 FBG 实现色散补偿备受关注。其中,基于 FBG 中间色散补偿方案的系统结构如图 1 所示。

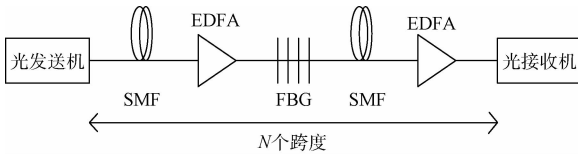


图 1 基于 FBG 中间色散补偿方案的系统结构

在采用 FBG 进行色散补偿的光纤通信传输系统中,为了获得显著的补偿效果,在实验中 FBG 和 SMF 的选择要通过式(1)来确定。

$$D(\lambda_s)L + D_{\text{FBG}}(\lambda_s) = 0 \quad (1)$$

式中: $D(\lambda_s)$ 为单模光纤 SMF 在 λ_s 这一工作波长处的色散系数, $D_{\text{FBG}}(\lambda_s)$ 为单个 FBG 在 λ_s 处的色散总量, L 为 SMF 的长度。

1.2 电色散补偿原理

电色散补偿(electricity dispersion compensation, EDC)技术由于其功率低、成本低且能实现信道的自适应补偿等特点而备受关注。EDC 技术主要以均衡器为基础,通常放置在传输系统的接收端,用于恢复由于色散和非线性效应

而引起的脉冲展宽与信号畸变,能大大减少码间干扰,降低波形畸变率,恢复出初始脉冲信号,从而提高系统的传输性能。EDC 技术有多种实现结构,主要包括前向反馈均衡器(feed forward equalizer, FFE)、判决反馈均衡器(decision feedback equalizer, DFE)、最大似然序列估计(maximum likelihood sequence estimation, MLSE)均衡器等^[11]。目前,应用最广泛的是将 FFE 和 DFE 相结合的均衡结构,以便实现对信道的自适应补偿,其结构组成如图 2 所示。

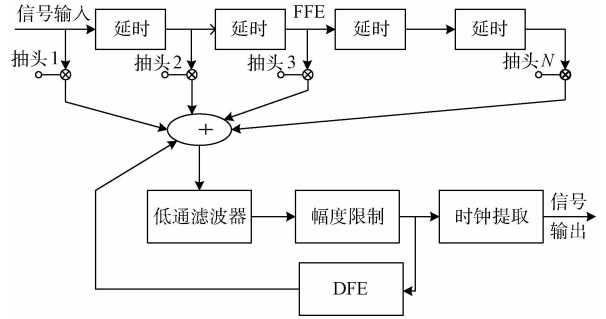


图 2 FFE 与 DFE 相结合的均衡结构

为了确定均衡器中的抽头系数,学者们提出了多种自适应均衡算法,如最小均方误差(LMS)算法、递归最小平方(RLS)算法、迫零算法(ZF)及各种变步长的自适应算法等^[12-14]。其中,LMS 算法的运算量小,每次运算仅需 $2N$ 次乘法(N 为均衡器的阶数),数值计算相对稳定,且具有比较小的失调,因此在工程实践中得到了普遍应用。而 RLS 算法具有较快的收敛速度,但是它计算量较大,计算复杂度高,实现困难且存在数值稳定的问题,故在实际中应用较少。因此,在本文的仿真模拟中,采用固定步长的 LMS 算法来确定均衡器的抽头系数。对于 LMS 算法中抽头系数的确定,是通过均方误差准则来实现的,其估算如式(2)所示。

$$\omega(n+1) = \omega(n) + 2\mu e(n)x(n) \quad (2)$$

式中: μ 为收敛因子,它用于控制收敛速度和稳定性的参数,取值范围为 $0 \leq \mu \leq 1/\lambda_{\text{max}}$, λ_{max} 表示输入信号 $x(n)$ 的自相关矩阵的最大特征值。通过上述公式可以得到,LMS 算法是利用瞬时误差来决定自适应滤波器的抽头系数,这样就会使计算抽头系数的迭代公式变得简单。该算法的收敛步长在一定范围内采用的是固定步长,所以只要找到最佳步长,就能达到很好的收敛。

2 系统仿真及结果分析

本次仿真采用光通信仿真软件 Optisystem 对单信道系统进行建模仿真,该系统的调制格式为 RZ, 占空比为 0.5, 传输速率为 40 Gbit/s, 所有放大器的增益均为 4 dB, 输入光功率均为 2 dBm, 整个传输系统的光纤均采用 G. 652 光纤, 为了实现色散补偿, 在传输链路中采用 FBG 中间补偿方案以及在接收端采用电色散补偿技术进行补偿, 该系统仿真结构如图 3 所示。

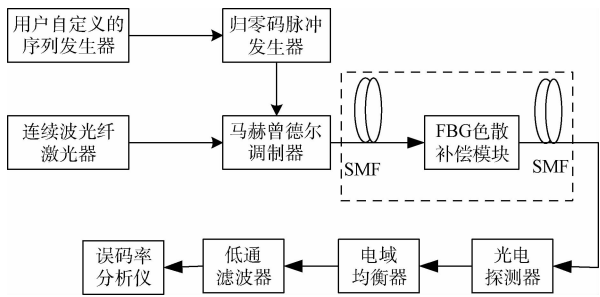


图 3 系统仿真框

从光源发出的频率为 40 GHz 的光脉冲经过 Mach-Zehnder Modulation 调制器调制成 40 Gbit/s 的光脉冲信号,经过 80 km 的 SMF 传输后,经过功率放大器进行信号放大,然后再进入光纤布拉格光栅完成色散补偿,接着被送入环路控制器。通过设置传输链路中环路控制器的循环次数 n 来决定整个系统的传输距离,本次环路控制器的参数 $n=10$,实现 800 km 的信号传输。最终得到 40 Gbit/s 的光脉冲信号,经过光电探测器和低通滤波器后,再利用电色散补偿技术进行补偿,补偿后的信号用误码分析仪进行误码率检测。该系统将 SMF、EDFA 和 FBG 的组合作为一个整体,其中包含两段 40 km 的 SMF,并在这段传输链路的中间利用 FBG 实施中间补偿,其补偿量的大小可通过式(1)计算得到,经过计算后可得 FBG 的色散补偿量为 $-1\ 360\ \text{ps}/\text{nm}$,利用该装置可实现准确的色散补偿,有效的降低色散的影响。系统中主要模块的参数设置如表 1 所示。

表 1 参数设置

参数	取值	单位
SMF 色散系数	17	$\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$
SMF 衰减系数	0.2	dB/km
SMF 色散斜率	0.08	$\text{ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$
SMF 非线性折射率系数	2.6×10^{-20}	m^2/w
SMF 纤芯有效系数	70	μm^2
FBG 的色散补偿量	1 360	ps/nm
入射光功率	2	dBm
EDFA 噪声指数	2	dB

在仿真实验中,电域均衡器采用的是最小均方 LMS 算法,主要是由于该算法计算量相对较小,原理简单且具有较小的失调,同时该算法存在一个最佳步长,所以只要找到一个合适的步长,就能达到良好的均衡效果。

对于单一的均衡器而言,均衡器的抽头数目越多补偿效果越好,但是随着抽头数目的增多,均衡器的结构就会变得越来越复杂,实现过程就变得越困难,但减少抽头数目,又达不到理想的补偿效果,因此,对于均衡器最佳抽头数目的选择至关重要。

在前人研究的基础上,先将前向 FFE 均衡器的抽头系数设为 6,通过改变 DFE 的抽头数目,可得系统 Q 值与 DFE 抽头数之间的变化关系,如图 4 所示。

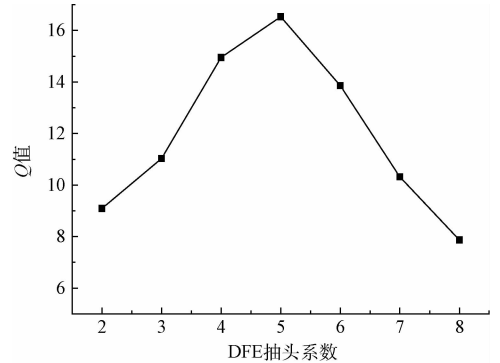


图 4 DFE 抽头系数与 Q 值的变化曲线

由图 4 可知,Q 值随着 DFE 抽头数目的增多并非单调变化,抽头数目由 2 增至 5 时,Q 值逐渐增大,说明误码率逐渐减小;抽头数目由 5 增至 8 时,Q 值逐渐减小,说明误码率逐渐增大。故可知,FFE-DFE 均衡器中的 DFE 抽头数目为 5 时,系统 Q 值最大,误码率最小,补偿性能最佳。

然后再固定 DFE 的抽头数目为 5,通过改变 FFE 的抽头数,得到系统 Q 值的变化曲线,如图 5 所示。由图 5 可知,抽头数目由 2 增至 4 时,Q 值逐渐增大,说明误码率逐渐减小;抽头数目由 4 增至 8 时,Q 值逐渐减小,说明误码率逐渐增大。同样可得,FFE-DFE 均衡器中的 FFE 抽头数目为 4 时,均衡效果最好。

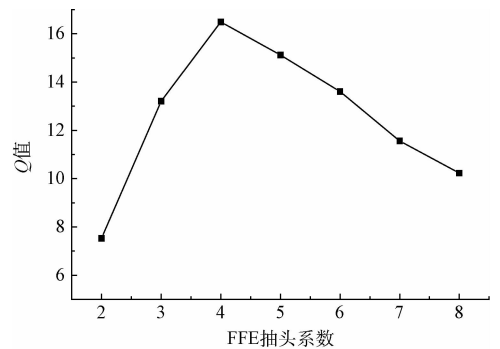


图 5 FFE 抽头系数与 Q 值的变化曲线

综上所述,FFE-DFE 均衡器的补偿效果并不是和抽头数目成正比关系的,而是存在一个最佳组合,即 FFE 的抽头数目为 4,DFE 的抽头数目为 5。采用这种组合结构既减少了抽头数目,又使均衡结构得到了优化,同时均衡效果也得到了很大程度的提高,增强了整个系统抗干扰的能力。

为了对光电色散补偿技术和电色散补偿技术的补偿性能进行对比分析,通过改变入射光功率的大小,研究分别采用光电色散补偿技术和全光色散补偿技术后系统 Q 值的变化趋势,分别如图 6 和 7 所示。

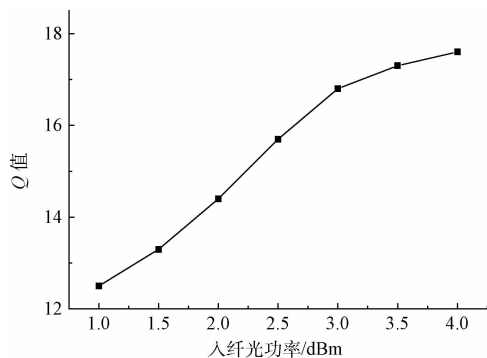


图6 光电色散补偿技术 Q 值变化曲线

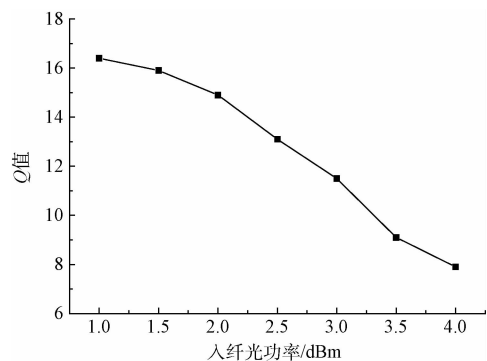


图7 全光色散补偿技术 Q 值变化曲线

经过对比分析可知,光电色散补偿技术的系统 Q 值随着入射光功率(1~4 dBm)的增大而增大,而全光色散补偿技术的系统 Q 值随着入射光功率(1~4 dBm)的增大而逐渐减小。这说明在入射光功率较大时,系统受非线性效应和色散的影响逐渐加强,其中光电色散补偿技术中的电色散补偿具有较强的抑制非线性效应的能力,故在功率较高时,仍能有效地消除码间干扰,恢复出原始波形,正确地接收信号,使整个传输系统不受影响,正常的完成信号传输。所以,采用光电色散补偿技术进行色散补偿的优势比较明显。

3 色散补偿在 WDM 系统的建模仿真分析

为了进一步实现对波分复用系统的色散补偿,结合文献[15]中的光纤光栅级联模型及级联原理,搭建该级联模块的仿真模型。针对 8 个 FBG 搭建的级联色散补偿模块如图 8 所示。该级联模块的工作原理:首先让 WDM 信号进入 FBG 色散补偿模块,然后通过光环行器(其中一对输入输出端口需设为无效端口),沿顺时针方向依次进入到每个 FBG 中,每个 FBG 只反射原 WDM 信号中对应频率的一个分信号,这样就分别实现了 WDM 系统中不同频率信号的色散补偿。最后通过功率合成器将这些反射回来的分信号重新合成一个复用信号,并送到光环行器中,通过光环行器的输出端口输出一个完整的经过色散补偿后的 WDM 信

号,这就是 WDM 系统中采用 FBG 级联模块实现色散补偿的过程。

本文采用级联的 FBG 模块来实现对 WDM 系统的色散补偿,同时采用在单信道系统中表现出良好补偿性能的光电色散补偿技术应用于 WDM 系统中。在该系统中,光发射机发射 8 个频率的信号,第一个频率为 193.1 THz,信道间隔为 100 GHz,经过光复用器合成一个 WDM 信号后在光纤中传输。整个传输链路包括 10 个跨段,实现总长为 800 km 的传输,其中每段包括一个级联的 FBG 模块、一段 80 km 的 SMF 及 EDFA。接收端接收并解复用该信号,再判决恢复出每个波长的原信号。在本次仿真中,依然在传输链路中采用级联的 FBG 中间色散补偿方案实现补偿,在接收端将信号分成两路,一路继续采用 FBG 实现色散补偿,另一路采用电色散补偿技术。其中电色散补偿技术中的均衡结构仍采用 FFE+DFE 的组合,算法为 LMS 算法。根据仿真后得到的 Q 值来判断色散补偿效果的优劣。

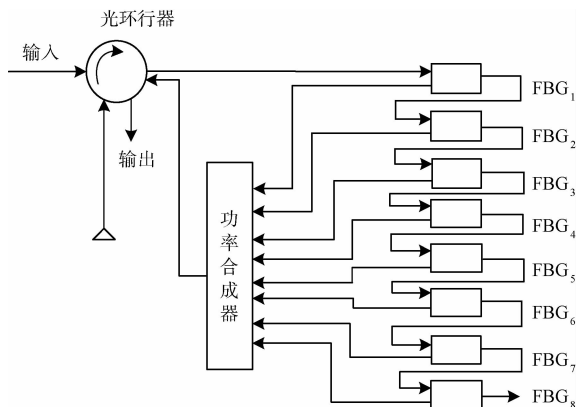


图8 FBG 级联原理

为了研究方便,以第一信道即 193.1 THz 的输出结果为研究对象,因为这个信道受色散和非线性效应影响严重,信号质量最容易变差[16]。将色散和非线性效应同时考虑时,仿真后得到系统的 Q 值分别如图 9(a)、(b)所示。由仿真结果可知,在两者均考虑的情况下,在接收端采用 FBG 进行色散补偿的系统 Q 值为 11.1,在接收端采用电色散补偿技术的系统 Q 值为 13.7,这说明电色散补偿技术能够有效地消除码间干扰,保证信息的正确传输,从而提高通信质量。这表明在抑制非线性效应上,光电色散补偿技术的补偿效果明显优于全光色散补偿技术。

在波分复用系统中由于复用信道数目越多,非线性效应的影响就越显著。因此,为了进一步研究非线性效应的影响,将对 16 信道的波分复用系统进行仿真建模,得到分别采用两种色散补偿技术后系统的 Q 值如图 10(a)、(b)所示。

从图 10(a)、(b)中可以看出,在 16 信道的波分复用系统中,也可以得出光电色散补偿技术的补偿性能优于全光

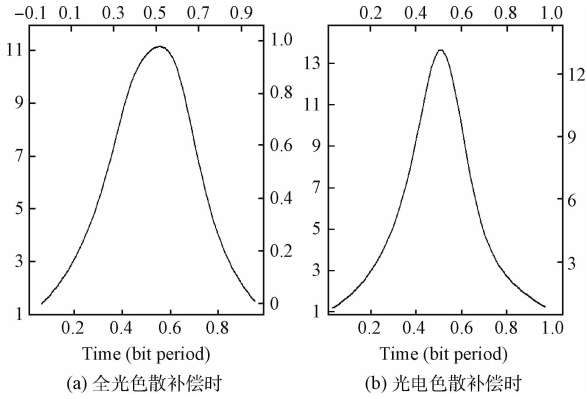


图9 采用不同色散补偿方式后系统的Q值

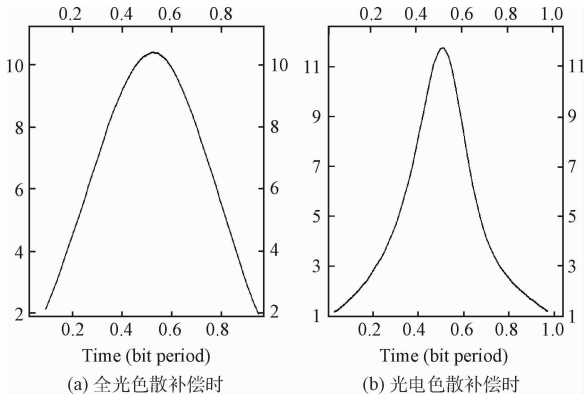


图10 采用不同色散补偿方式后系统的Q值

色散补偿技术的结论。

基于光电色散补偿技术分别对8信道和16信道的波分复用系统进行建模仿真,由仿真结果可以得出,在同时考虑色散、非线性效应的影响时,光电色散补偿技术的Q值均高于全光色散补偿技术的Q值,这充分说明了电色散补偿技术能够有效的抑制非线性效应的影响,从而使光电色散补偿技术表现出良好的补偿性能。特别是在波分复用系统中,由于该系统复用的信道数目较多,导致信道间距变窄,信道间容易引起信号串扰,导致波形畸变,最终造成信息的错误传输,使系统的通信容量减少。尤其是会产生新频率分量的FWM现象,如果进入信道内会导致信道间的信号串扰,同时也会产生过多的噪声。除此之外,还有自相位调制和交叉相位调制,这些非线性效应也会引起脉冲展宽,对相邻波长的信号传输造成干扰,从而导致整个通信系统的性能恶化。然而色散又会在一定程度上抑制非线性效应,所以对于光纤通信系统而言,适当的保持系统中的色散,合理的进行色散补偿,不但对抑制非线性效应起作用,也能在很大程度上提高传输系统的性能,从而提高通信质量。

4 结 论

本文利用FBG中间色散补偿方案的光电色散补偿技

术,基于Optisystem软件分别对RZ、40 Gbit/s的单信道和多信道系统进行建模仿真,由仿真结果可知,光电色散补偿技术的补偿效果明显优于全光色散补偿技术。这主要是由于EDC技术具有自适应补偿的特点,且电子器件相比于光器件的价格低,同时由于采用光器件进行色散补偿时,会引入额外的信号衰减和噪声积累,需要提供更多的光放大器来弥补损耗,成本较高,另外对光源的要求也很高。故在本文中采用光电相结合的色散补偿技术,能够充分发挥两者的优势,以便在高速光纤通信系统中得到广泛应用,从而实现对现有G.652光纤通信系统的升级与扩容。

参考文献

- [1] 聂大德. 长距离高速光纤通信中的色散补偿技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2012.
- [2] LIU H J, REN B, FENG J C. Dispersion compensation in an open-loop all-optical chaotic communication system[J]. Chinese Physics B, 2012, 21(4):138-144.
- [3] 张晓青, 贾豫东, 周哲海, 等. 后向拉曼散射材料色散的位置匹配误差校正[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(12):2782-2789.
- [4] SHUKUNAMI N, TSUZUKI T. Method for measuring nonlinear optical properties, and optical amplifier and optical transmission system using same: US, US7692849[P]. 2010.
- [5] 鲁力. 高速光纤通信系统中电子色散补偿技术的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2012.
- [6] YIN B, LIU Z, FENG S, et al. Stable single-polarization single-longitudinal-mode linear cavity erbium-doped fiber laser based on structured chirped fiber Bragg grating [J]. Applied Optics, 2015, 54(1):6.
- [7] ROBERTS K B, STRAWCZYNSKI L, O' SULLIVAN M S. Electrical domain compensation of non-linear effects in an optical communications system: EP, US7756421[P]. 2010.
- [8] 邴林林. 高速光通信新型调制方式下EDC技术研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2011.
- [9] 毛昕蓉, 张建华, 赵谦. 一种基于Opti-system的静态与动态色散补偿相结合方案研究[J]. 应用光学, 2015, 36(6):888-892.
- [10] 何煦, 成贤镨. 大型中阶梯光栅衍射效率测试仪器设计与集成[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9):2057-2067.
- [11] 钱丽霞. 基于长线传输系统的自适应FFE-DFE均衡技术的研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2015.
- [12] 孙永梅, 李晖. 数字通信系统中自适应均衡技术的研究[J]. 信息技术, 2006(4):53-55.

- [13] 陈泳, 田金鹏, 刘燕平. 一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法[J]. 电子测量技术, 2015, 38(4):27-31.
- [14] 李明, 黄华, 夏建刚. 基于自适应均衡器的 LMS 和 RLS 算法仿真分析[J]. 微型机与应用, 2009, 28(20):56-58.
- [15] 周培. 级联啁啾相移光纤光栅滤波特性及其应用研究[D]. 桂林:广西师范大学, 2016.
- [16] 张鹏飞, 王华奎. 16×40 Gbit/S DWDM 系统色散补偿和调制方式研究[J]. 光通信研究, 2013(1):1-4.

作者简介

刘小磊, 博士, 讲师, 主要研究方向为光码分多址、光载无线通信和光模块等。

E-mail: 438455939@qq.com